УДК 621.384.6

ИСТОЧНИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ЗАКОНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Е.Т. Протасевич

Томский политехнический университет
E-mail: lev@tpu.ru

Описан секционированный соленоид и схема управления шунтирующими сопротивлениями, которые обеспечивают выбор различных законов распределения магнитного поля на длине 1 м в аксиальном направлении с пределами изменения напряженности магнитного поля от 0,5 до 2,0 кЭ в начале линейного участка распределения.

Для повышения эффективности взаимодействия электронов в релятивистских СВЧ приборах и изучения новых методов ускорения заряженных частиц необходимо не только формирование магнитного поля с определенным законом распределения, но и возможность быстрого изменения в процессе работы исходного распределения. В частности, такая задача рассматривается при экспериментальном исследовании взаимодействии электронов с незамедленной Н-волной прямоугольного волновода в нарастающем магнитном поле [1, 2]. Для ее решения удобно использовать соленоид, состоящий из отдельных секций, которые подключены последовательно к источнику постоянного напряжения. Однако для изменения начального закона распределения магнитного поля в аксиальном направлении z необходимо осуществление регулировки токов в отдельных секциях. В этом случае система питания соленоида усложняется из-за необходимости использования дополнительных источников напряжения для каждой секции. Кроме того, размещение резонатора бегущей волны как основного элемента ускорителя требует компенсации провала магнитного поля в зазорах между секциями соленоида, между которыми размещается прямоугольный волновод [1, 2].

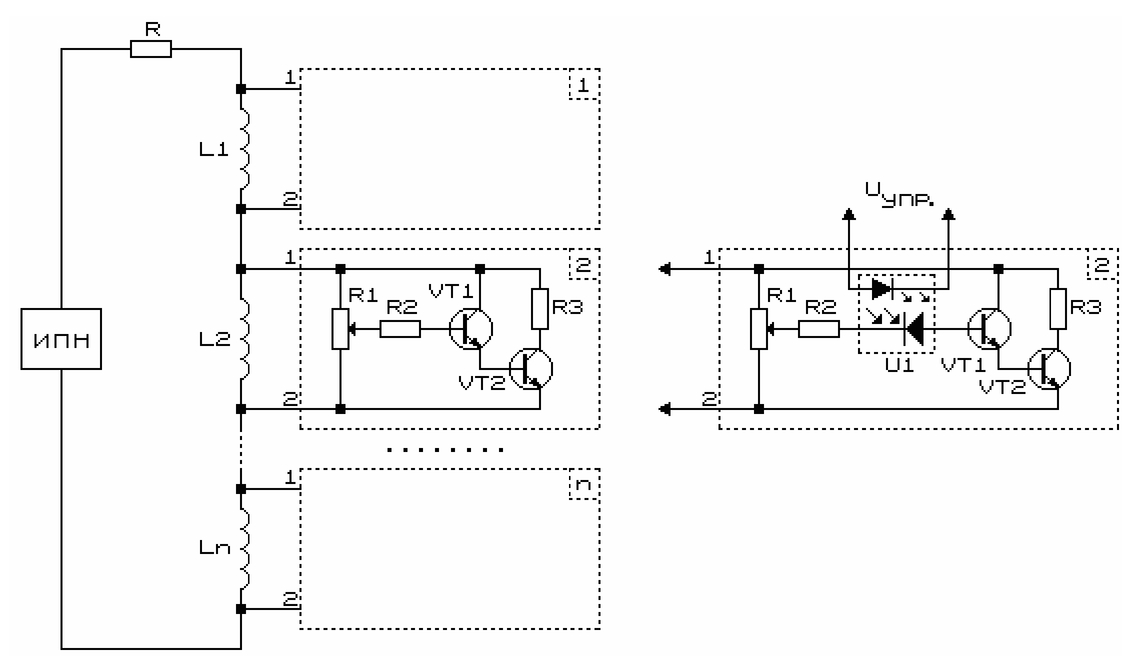


Рис. 1. *Схема регулировки токов в отдельных секциях соленоида: ИПН – источник постоянного напряжения; L1, L2, ... Ln – индуктивности секций соленоида; 1, 2 ... n – номера секций; VT1, VT2 – транзисторы; R – ограничительное сопротивление*

Цель настоящей работы – демонстрация возможности создания линейно изменяющегося в аксиальном направлении магнитного поля с регулируемым углом наклона распределения $H = f(z)$.

В простейшем случае получить требуемый закон распределения можно за счет параллельного подключения к каждой секции шунтирующих сопротивлений: чем больше диапазон изменений сопротивлений, тем шире возможности для регулировки величин магнитного поля и его распределения.

На рис. 1 представлены две схемы регулирования токов в секциях соленоида при их последовательном подключении к источнику постоянного напряжения:

– ручная (в отдельных секциях), когда величина коллекторных токов транзисторов VT1 и VT2 определяется величиной сопротивления R1;
– полуавтоматическая, когда сопротивление R1 определяет лишь начальное смещение транзистора VT1, а изменение коллекторного тока транзистора VT2 устанавливается напряжением управления $U_{упр}$, которое подается на оптоэлектронную пару.

Из рисунка видно, что оба предлагаемых устройства представляют собой управляемые шунтирующие сопротивления, которые подключаются параллельно каждой секции соленоида. Их использование позволяет осуществлять плавную подстройку магнитного поля во время работы установки. Для уменьшения мощности в цепи управления использованы схемы составного транзистора Дарлингтона, что позволяет применять потенциометры R1, вынесенные на пульт управления или использовать оптоэлектронную пару.

Необходимо отметить, что обе схемы, представленные на рис. 1, являются простейшими и не позволяют симметрировать базовые токи транзисторов, что может привести к токовой перегрузке одних транзисторов и недогрузке других. Однако в нашем случае [1, 2] это никак не отразилось на надежности работы источника магнитного поля. Основная трудность при его эксплуатации состояла в отводе тепла от катушек соленоида, когда рассеиваемая в них мощность достигала 40 кВт в непрерывном режиме работы.

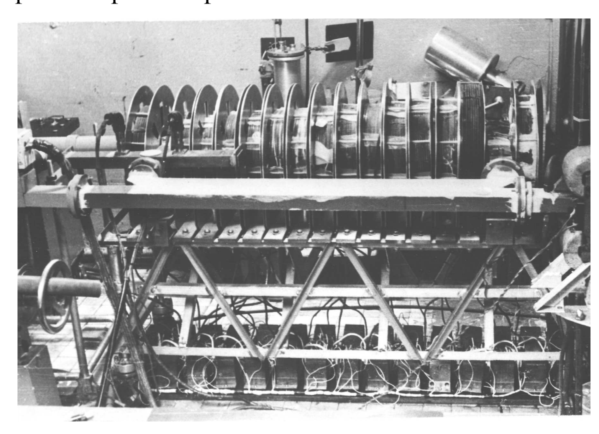


Рис. 2. *Внешний вид соленоида в комплексе с авторезонансным СВЧ ускорителем электронов: вверху секции соленоида, внизу – шунтирующие сопротивления*

Все 15 секций соленоида имели одинаковую высоту, и их намотка была выполнена медным проводом прямоугольного сечения в виде бескаркасных катушек. Питание соленоида осуществлялось от источника постоянного напряжения (155 А при напряжении 230 В). Внешний вид соленоида показан на рис. 2. Его длина составляет около 1 м, а ве-

личина напряженности магнитного поля в начале линейного участка может плавно регулироваться от 0,5 до 2,0 кЭ.

Распределение магнитного поля в соленоиде контролировалось с помощью измерителя магнитной индукции типа Е11-3 и баллистического метода. Во втором случае, изменение магнитного поля было дискретным, за счет перемещения измерительной катушки вдоль силовых линий магнитного поля с постоянным шагом, равным 1 см.

Для исключения ручной регулировки тока одновременно во всех секциях соленоида была разработана специальная программа расчета требуемого профиля магнитного поля $H = f(z)$. Величина тока в отдельных секциях задавалась вначале расчетным путем, а затем по ней подбирались необходимые величины токов в секциях (см. рис. 3). Однако на практике для упрощения схемы управления было достаточным расчетные значения токов устанавливать вручную. При точности установки токов, равной 1...2 %, погрешность воспроизведения экспериментальной кривой $H = f(z)$ по сравнению с расчетной зависимостью не превышает 2 %.

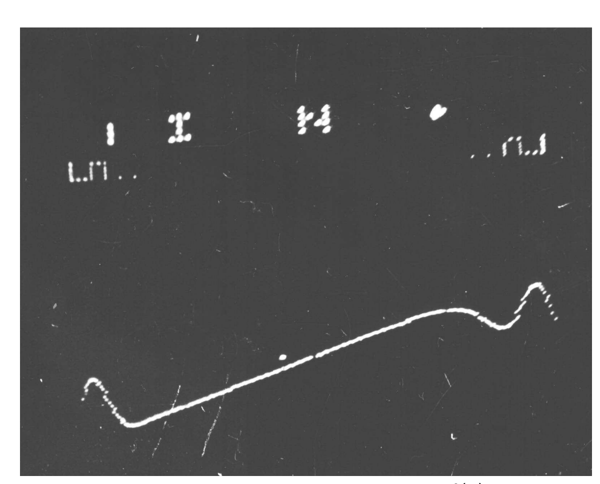


Рис. 3. *Пример расчетной зависимости H = f(z)*

На рис. 4 приведены экспериментальные кривые распределения магнитного поля по длине соленоида, полученные при различных значениях токов, протекающих в отдельных секциях. Изменение характера распределения кривой $H = f(z)$ производилось с использованием шунтирующих сопротивлений (рис. 1). Погрешность измерений $\Delta H/H$ не превышала 1 %. Кривые 1, 2, 6 соответствуют линейному закону распределения $H = f(z)$ для случая плавного изменения величины тока, значение которого было одинаковым во всех секциях. Кривые 3–5 получены с использованием схемы шунтирующих сопротивлений, за счет использования которой величина токов, протекающих в отдельных секциях, отличалась друг от друга в 1,5...5,0 раз.

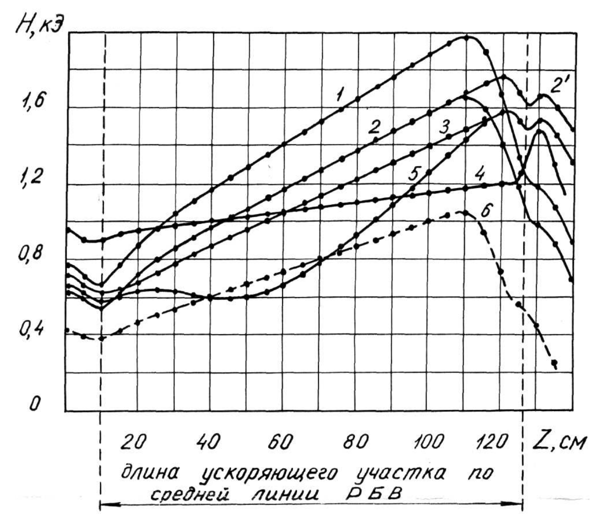


Рис. 4. *Распределения магнитного поля в аксиальном направлении*

Используя стандартный алгоритм расчета напряженности магнитного поля (см. [3] и цитируемую там литературу) с помощью схемы шунтирующих сопротивлений и ПЭВМ можно подобрать практически любой закон распределения магнитного поля. На практике она не превышает 1...2 %, что оказывается вполне достаточным для проведения большинства экспериментальных работ [1, 2].

Таким образом, использование соленоида со схемой шунтирующих сопротивлений обеспечивает возможность реализации заданного закона распределения магнитного поля в аксиальном направлении, а сама схема позволяет обеспечить дистанционный управление за таким распределением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Протасевич Е.Т. Авторезонансный ускоритель электронов // Приборы и техника эксперимента. – 1994. – № 1. – С. 47–53.
2. Протасевич Е.Т. Экспериментальные исследования взаимодействия электронов с незамедленной волной H_{10} прямоугольного волновода в нарастающем магнитном поле // Журнал технической физики. – 1995. – Т. 65, вып. 6. – С. 133–140.
3. Протасевич Е.Т. Магнитные волны. Статьи, выступления. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 1998. – 90 с.